

# 无线传感器分簇网络中 MAC 协议的研究\*

姜 华, 袁晓兵, 王 鹏, 刘海涛

(中国科学院 上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

摘 要: 通过对 CSMA 协议的分析, 在基于信道接入分簇网络中提出了改进的 MAC 协议, 即 M-CSMA 协议。最后, 利用 OPNET 仿真实现了该协议, 并给出了相关的仿真结果。

关键词: 无线传感器网络; 分簇算法; MAC 协议; OPNET

中图分类号: TP393 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2007)03-0265-03

## Research of MAC Protocol for Wireless Sensor Cluster Networks

JIANG Hua, YUAN Xiao-bing, WANG Peng, LIU Hai-tao

(Shanghai Institute of Microsystems & Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** The CSMA protocols were analyzed and a new MAC protocol in Channel Access-Based Cluster( CABC) arithmetic named M-CSMA was introduced. Finally, the simulation results were given by OPNET.

**Key words:** wireless sensor network; cluster arithmetic; MAC protocol; OPNET

作为全球未来十大技术之一的网络传感器技术已开始受到人们的重视。无线传感器网络综合了传感器技术、嵌入式计算机技术、通信技术、电源技术等多项技术, 可以使人们在任何时间、地点和环境获得较为详细、可靠的信息, 可广泛应用于诸如国家安全、军事领域、医疗健康、交通管理、环境监测、空间探索、商业等领域中<sup>[1]</sup>。

无线传感器网络是集成了监测、控制及无线通信的网络系统, 通常节点数目庞大( 上千甚至上万), 节点分布密集; 网络中传感节点的能量、处理能力、存储能力和通信能力等都十分有限<sup>[2]</sup>; 同时传感节点检测的数据通常有大量冗余或者数据相关, 为了节约网络的能耗需要作初步的数据融合。为适应无线传感器网络的这些特点, 网络分簇成为研究的热点。

分簇算法将网络划分成可以互相连通并覆盖所有节点的多个簇, 并在网络结构发生变化时更新簇结构以维护网络的正常功能。簇头节点担负数据融合的任务, 减少了数据通信量; 分簇式的拓扑结构有利于分布式算法的应用, 适合大规模部署的网络<sup>[3]</sup>。

许多分簇算法重点在于研究形成分簇的合理性以及簇头节点的选择方面, 如 LEACH 算法<sup>[4]</sup>、HEED 算法<sup>[5]</sup>、TEED 算法<sup>[6]</sup>和 CABC 算法, 而较少考虑 MAC 的协议。它们在分簇形成阶段均使用的是 CSMA 协议, 在分簇稳定阶段 MAC 协议有所区别。本文重点在于研究分簇形成阶段中基于 CSMA 的 MAC 协议对整个分簇网络的影响。

## 1 MAC 协议的设计

### 1.1 CSMA 协议分析

CSMA 是一种常用竞争的方法来决定对媒体访问权的协

议。在网络中, 每个节点都能独立地决定数据包的发送, 若两个或多个节点同时发送数据包就会产生冲突, 导致所发送的数据包出错。因此, 一个节点发送信息成功与否, 在很大程度上取决于监测总线是否空闲的算法, 以及当两个不同节点同时发送的分组发生冲突后所使用的中断传输的方法<sup>[7]</sup>。

目前, 对 CSMA 协议的定义及分类有很多种, 其中针对信道划分方式的不同可分为: 时隙 CSMA 和非时隙 CSMA; 根据节点侦听到信道为忙时处理方式的不同可分为: 坚持的 CSMA 和非坚持的 CSMA; 根据节点侦听到信道为空闲时处理方式的不同可分为: I-坚持的 CSMA 和 P-坚持的 CSMA。分类图<sup>[8]</sup> 如图 1 所示。

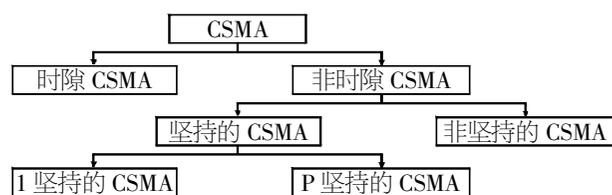


图 1 CSMA 的分类图

其中时隙 CSMA 中的划分与非时隙 CSMA 的划分相同, 因此, 图中只画出了非时隙 CSMA 的分类。针对无线传感器网络的特点, 时隙 CSMA 需要时间同步, 为节省能耗, 降低硬件实现的复杂度, 因此传感节点只考虑非时隙的 CSMA 协议。

非时隙 CSMA 协议首先对媒体上是否有载波进行监听, 以确定是否有别的传感节点在传输数据。如果媒体空闲, 该传感节点便可传输数据; 否则, 该站点将避让一段时间后再作尝试。这就需要有一种退避算法来决定避让的时间。常用的退避算法有三种:

(1) 非坚持的 CSMA 算法。一旦侦听到信道空闲, 立即发送报文; 否则, 随机等待一段时间后再侦听。

收稿日期: 2005-10-14; 修返日期: 2006-01-07 基金项目: 中国科学院创新基金资助项目(KGCX2\_SW\_108)

作者简介: 姜华(1977-), 男, 山东威海人, 博士研究生, 主要研究方向为无线传感器网络; 袁晓兵(1969-), 男, 辽宁鞍山人, 研究员, 博士, 主要研究方向为无线传感器网络; 王鹏(1978-), 男, 河南人, 博士, 主要研究方向为多载波 CDMA; 刘海涛(1968-), 男, 新疆人, 研究员, 博导, 博士, 主要研究方向为无线传感器网络。

(2) 1-坚持的 CSMA 算法。节点在发送数据包之前，先侦听信道，若信道空闲，立即发送；否则继续侦听，直至出现信道空闲。

(3) P-坚持的 CSMA 算法。当节点侦听到信道空闲时，以给定的概率  $p$  在经过一个随机分配的延时后发送数据包文，而以概率  $q = 1 - p$  重新监听信道。

比较以上三种 CSMA 算法可知，非坚持 CSMA 算法传输介质的利用率很低；1-坚持 CSMA 算法网络冲突概率很高；P-坚持 CSMA 算法在这两方面的指标介于两种算法之间，它试图降低 1-坚持 CSMA 算法的冲突率，提高非坚持 CSMA 算法的传输介质利用率。但传输介质的利用率仍不是太高，因为即使几个终端都有数据要发送，传输介质仍然有可能处于空闲状态(因  $p < 1$ )。

另外还有预测 P-坚持算法，它的消息服务类型必须选择应答服务<sup>[9]</sup>才能实现预测。因为在无线传感器网络在分簇形成过程中许多消息是广播类型的，不需要应答服务，所以 P-坚持算法不适合分簇网络，在此不讨论。

### 1.2 M-CSMA 协议描述

针对无线传感器分簇网络的特点，提出了在分簇形成阶段采用 1-坚持和 P-坚持相结合的混合 CSMA 协议，即 M-CSMA (Mix CSMA protocol) 协议。由上面所述，在 P-坚持的 CSMA 协议中，当传感节点检测到信道空闲时，才产生概率  $p$  来发送数据，而以概率  $1 - p$  退避等待。M-CSMA 协议采用的是当传感节点检测到信道忙时，产生概率  $p$  进入信道监听，直到信道空闲后，将数据包发送出去，此时类似于 1-坚持的 CSMA 算法。M-CSMA 具体实现过程的状态转换图如图 2 所示。

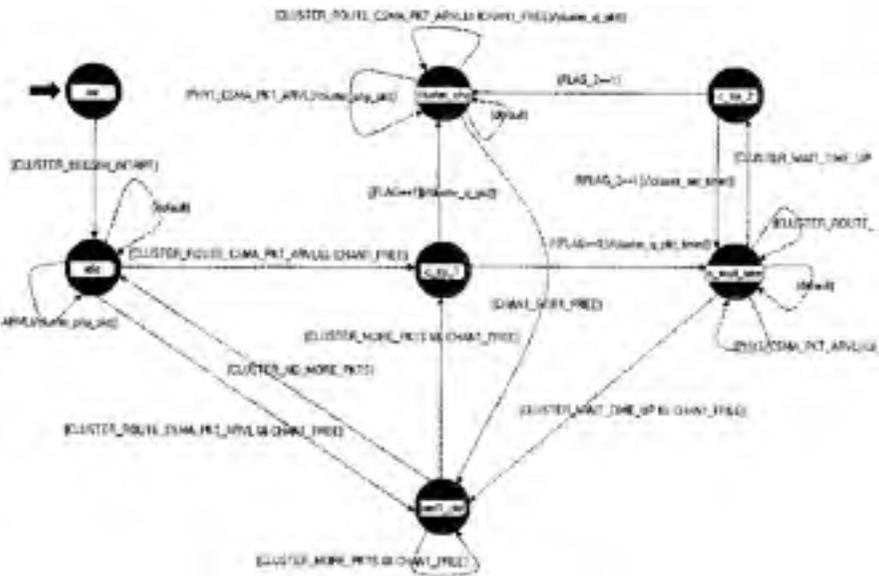


图 2 进程 MAC 协议状态图

传感节点经过初始化状态 init 初始化关键参数后进入 idle 状态，等待网络层的数据包。M-CSMA 具体协议过程概述如下：

(1) 收到数据包后，检查信道，如果信道忙，则进入 try\_or\_wait 状态，计算概率  $p$ ，概率  $p$  的值服从贝努利分布，即

$$P_x(x_0) = \begin{cases} 1 - p & x_0 = 0 \\ p & x_0 = 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中，均值  $e(x) = p$  方差  $\sigma_x^2 = p(1 - p)$ ，设定  $FLAG = x_0$ 。

(2) 如果  $FLAG = 1$ ，则进入 sensor\_chan 状态，监听信道直到信道空闲，然后进入 xmt\_pkt 状态，将数据包发送出去。在监听信道期间，如果网络层有数据包到达，则直接将数据包放入队列。

(3) 如果  $FLAG = 0$ ，则进入 wait\_a\_time 状态，先将数据包

放入队列，然后设定随机等待时间  $t_w$ ，其中  $t_w$  的值服从均匀分布，即

$$f_x(x_0) = \begin{cases} 1 / (b - a) & a < x_0 < b \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中， $a < x < b$  均值， $e(x) = (a + b) / 2$ ，方差  $\sigma_x^2 = (b - a)^2 / 12$ ，设定  $a = 0$ ， $b = 0.05s$ ， $t_w = x_0$ 。在退避等待期间，如果网络层有数据包到达，则直接将数据包放入队列。

(4) 当随机等待时间  $t_w$  到达后，检测信道是否空闲，如果信道忙，则进入状态 try\_or\_wait2，执行与 (1) 相似的操作，然后判断 FLAG2 的值。如果  $FLAG2 = 1$ ，则进入 sensor\_chan 状态，执行 (2) 的操作；如果  $FLAG2 = 0$ ，则回到 wait\_a\_time 状态，继续执行 (3) 操作。

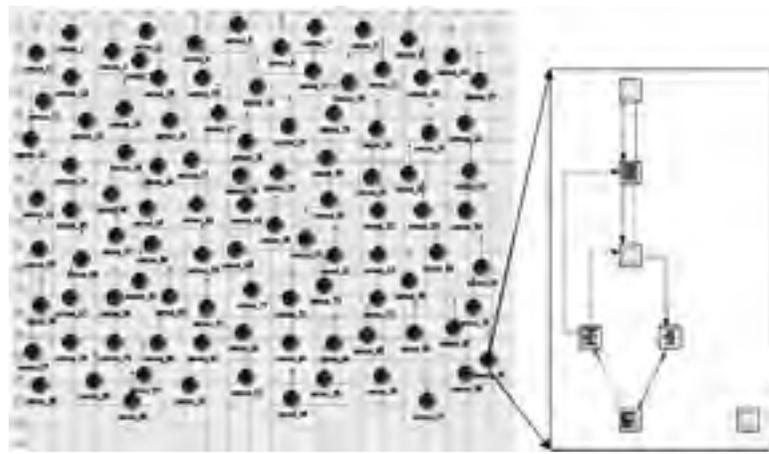
(5) 当随机等待时间  $t_w$  到达后，检测信道空闲，则直接进入 xmt\_pkt 状态，将数据包发送出去。

(6) 当传感节点进入 xmt\_pkt 状态后，首先判断队列是否为空，如果不为空，则从队列里取出要发送的数据包，发送出去；如果还有数据包要发送，则检测信道是否空闲，如果空闲，则继续发送数据包；如果信道忙，则直接进入 try\_or\_wait 状态，执行 (1) 操作。

## 2 网络仿真的实现

将 100 个传感器随机布设在  $1200\text{ m} \times 1000\text{ m}$  的区域，如图 3 所示。针对 OPNET 仿真工具的特点，以下分网络级、节点级和进程级三个层次有重点地介绍系统模型的实现。

### 2.1 网络级系统模型



(a) 无线传感器网络结构图 (b) 节点结构

图 3 网络级系统模型

图 3(a) 为传感节点上的有向线段表示节点移动的初始状态，随时间变化，节点将根据仿真中设定的概率  $p_{direction}$  产生随机的移动方向。其中  $p_{direction}$  的随机取值为 -1, 0 和 1。  $D_{present} = D_{present} + D_{new\_direction}$ ，其中  $D_{new\_direction} = p_{direction} \times D_{phase}$ ， $D_{phase} = 60$ ，为设定的相位值。则传感节点的运动方向为

$$D_{present} = \begin{cases} D_{present} + p_{direction} \times D_{phase} + 360 & D_{present} < 0 \\ D_{present} + p_{direction} \times D_{phase} - 360 & D_{present} \geq 360 \\ D_{present} + p_{direction} \times D_{phase} & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

网络的分簇结构中，簇头表示为  $C_i$  ( $i$  为形成簇的编号，即成为簇头的传感节点的标号)，成员节点表示为  $M_i$  ( $i$  为所属簇号)。

### 2.2 节点级模型

网络中的传感节点标志为 sensor\_i ( $0 \leq i < 99$ )，并且所有的传感节点都有相同的节点模型，如图 3(b) 所示。传感器节

点在系统仿真模型中只有两种状态,即成员状态和簇头状态。

(1) 进程模块 MOVE 主要负责传感节点的移动。

(2) 进程模块 PHY 完成物理层的功能,在仿真中根据设定的接收灵敏度和发送距离来管理包的接收与发送。

(3) 进程模块 CSMS 实现了数据链路层中 MAC 层的功能,在仿真中采用 M-CSMA 算法实现信道的接入。

(4) ROUTE 进程模块主要完成基于信道接入的分簇算法。

(5) Radio\_rcv, Radio\_xmt 和 Radio\_antenna 模块实现了无线链路的仿真,通过设定其中的参数来模拟实际的无线信道。因为本文重点不在无线信道的研究,所以只给出关键的参数,如表 1 所示。

表 1 无线信道参数列表

参数类型	参数值	参数类型	参数值
带宽 $B$ (k)	100	纠错门限 (dB)	1 E-012
最小频率 $f_{min}$ (M)	900	地面速度 $v_{ground}$ (m/s)	5
发射功率 $P_{tx}$ (W)	0.001	垂直速度 $v_{ascent}$ (m/s)	0
调制方式	Bpsk	接收灵敏度 (dBm)	-85
噪声系数 $NF$ (dB)	3	收发距离 (m)	450
天线高度 (m)	0.05	簇头节点极限距离 (m)	200

### 2.3 进程级模型

#### 2.3.1 ROUTE 进程模型

基于信道接入分簇算法的 MAC 协议研究,分簇算法不是本文的研究重点,在此只简要叙述。基于信道接入分簇算法的实现可分为四个阶段,即分簇建立阶段、分簇维护阶段、分簇调整阶段和分簇取消阶段。在分簇建立阶段,一个节点如果剩余能量超过规定极限能量值,则试图接入信道来声明自己是簇头,如果在它的所有邻居节点中最先成功地发送了簇头声明控制消息,那么它将成为簇头,即按照“最先声明优先”的规则来选举簇头。在分簇维护阶段,传感节点如果是成员状态,则周期发送 HEART\_BEAT 消息;如果是簇头节点,则周期发送 HELLO 消息以维持簇结构。分簇调整阶段主要是调整簇成员的归宿和簇头节点间的距离。分簇取消阶段主要是传感节点能源即将耗尽时,将发送 DISCONNECT 消息以取消分簇结构。图 4 为 ROUTE 的进程模型。

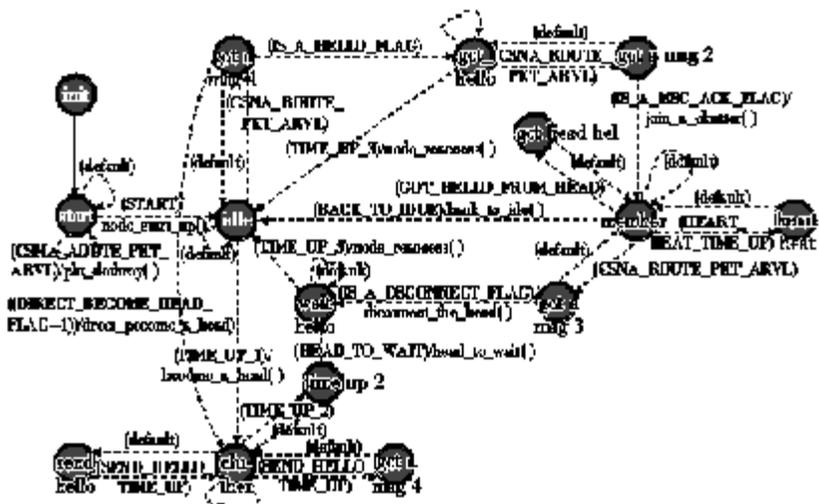


图 4 进程 ROUTE 的仿真模型

#### 2.3.2 MAC 进程模型

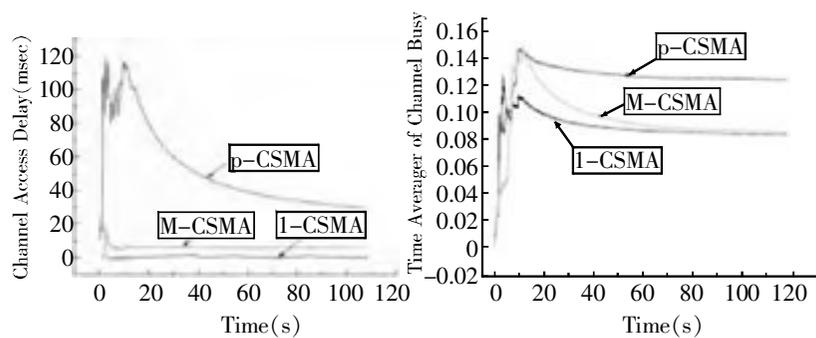
MAC 进程模型为 M-CSMA 协议的实现,在第 1 节有详述,在此不再累述。

### 3 仿真结果分析

#### 3.1 信道特性比较

设定式(1)的概率值为  $p=0.5$ ,式(2)中随机等待时间  $t_w$

的上限  $b=0.05s$ ,在统一的仿真场景模式下,分别使用 1-坚持的 CSMA 算法、P-坚持的 CSMA 算法和 M-CSMA 算法得到的有关信道特性的结果(图 5)。



(a) 信道接入延迟

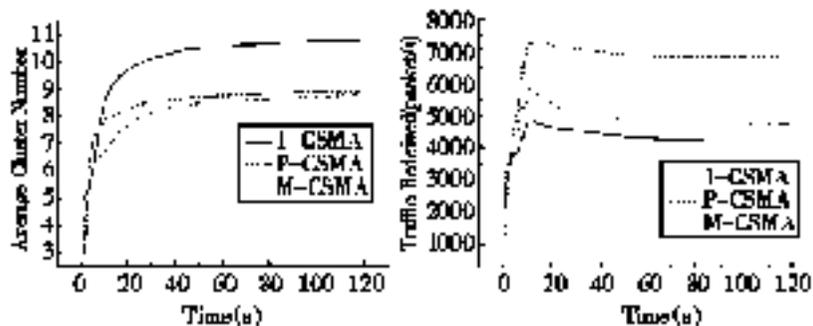
(b) 平均信道利用率

图 5 各种算法得到的有关信道特性的结果

从图 5(a) 中可以看出, M-CSMA 的信道接入延迟介于 1-坚持 CSMA 与 P-坚持 CSMA 之间,并且在前 10s 的分簇形成过程中, M-CSMA 的信道接入延迟只有 P-坚持 CSMA 的 1/10,十分接近 1-坚持的 CSMA。由图 5(b) 中可知, M-CSMA 在前 10s 的分簇形成过程中的平均信道利用率与 P-坚持 CSMA 相似,这说明 M-CSMA 算法融合了 1-坚持和 P-坚持 CSMA 算法的优点,既降低 1-坚持 CSMA 算法的冲突率,又提高 P-坚持 CSMA 算法的传输介质利用率。

#### 3.2 分簇网络性能比较

在与上面相同的条件下仿真得到有关分簇网络性能的结果如图 6 所示。



(a) 平均分簇数目

(b) 平均信道接收数据包

图 6 分簇网络性能的结果

从图 6(a) 中可以看出, M-CSMA 的平均分簇数目最小,大约为 8 个,而 1-坚持 CSMA 分簇为 11 个, P-坚持的分簇虽然与 M-CSMA 相似,但在分簇形成阶段明显分簇数目要比 M-CSMA 的多 1 个左右。从图 6(b) 中可知, M-CSMA 的平均信道接收数据包介于 1-坚持与 P-坚持 CSMA 算法之间,说明在分簇数目相似的情况下, M-CSMA 数据包的冲突率低于 P-坚持的 CSMA,所以数据包重发几率小,因而平均信道接收数据比 P-坚持的 CSMA 少大约 2 000 个;在平均信道接收数据包相似的情况下, M-CSMA 的平均分簇数目比 1-坚持的 CSMA 少 3 个,因为数据包的冲突导致节点收不到相应的响应数据包,从而导致节点重新分簇而形成新簇头,结果导致网络的分簇数目增加,从而影响了分簇网络结构,增加了网络的能量消耗。

### 4 结束语

无线传感器网络是涉及多学科的研究领域,具有十分广阔的应用前景。针对分簇网络的 MAC 展开研究,在分析了常用的 CSMA 算法后,提出了 M-CSMA 协议,并在基于信道接入分簇网络中得到验证。通过仿真结果分析可知, M-CSMA 协议结合了 1-坚持和 P-坚持算法的优点,既降低 1-坚持 CSMA 算法的冲突率,又提高 P-坚持 CSMA 算法的传输介质利用率。(下转第 270 页)

则取全部已算出信任度的节点)。采用算术平均法计算出第  $i$  个文件版本这组节点的平均信任度  $t_i$  和平均不信任度  $dt_i$ , 计算公式为

$$t_i = \frac{k \text{ 个节点的信任度之和}}{k}, dt_i = \frac{k \text{ 个节点的不信任度之和}}{k}$$

第四步  $i = i + 1$ , 若  $i = n$ , 重复第三步。

第五步选择下载版本与下载文件。将  $n$  个文件版本按不信任度降序和信任度升序排列。选择排在第一位的文件版本, 并随机地从该文件版本对应的一组节点中的一个或几个节点下载文件。当然为了保证安全, 选择在 IP 地址过滤器外的那些节点下载。当被选择下载的节点(设为  $x$ ) 有多个节点需要下载同一文件时, 则采用排队机制,  $x$  查找本地数据库中的交易次数  $m$ , 按  $m$  降序将需要下载的节点排队,  $m$  值高的节点优先下载。

第六步更新信任和可信向量。根据下载的服务质量, 判断此次下载成功与否, 成功则信任向量左插“1”, 同时对参与该文件版本有关节点的信任查询提供了反馈的有关节点的可信向量左插“1”; 否则信任和可信向量均左插“0”。

#### 4 仿真实验及结果分析

为了证明改进模型的有效性, 进行了仿真实验, 将两种模型进行对比。考虑到评价指标的客观性, 主要就恶意文件的下载比例进行了比较。

仿真实验的场景是用 Java 开发的一个仿真文件共享网络, 类似于 Gnutella 的分布式路由结构。不失一般性, 将仿真参数设置为

节点数: 1 000

文件版本数: 1 000

每节点原始文件数: 10

文件查询消息和信任查询消息的 TTL: 3

周期性变换化名恶意节点的比例: 10%

$T = C = 2$ , 向量长度  $d: 32$

图 1 的横坐标是下载次数, 纵坐标是恶意文件的下载比

率。可以看出, 改进模型 WeightRep 对阻止恶意文件下载、隔离恶意节点的作用比 SELUCK 模型更有效。

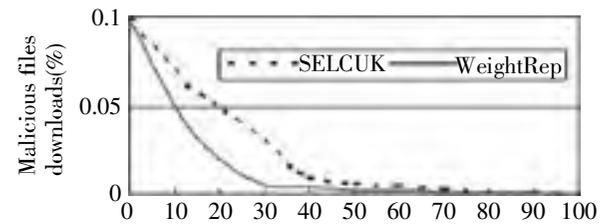


图 1 WeightRep vs SELUCK 仿真数据对比曲线

#### 5 结束语

本文提出了一种改进模型 WeightRep, 并详细介绍了 WeightRep 模型的设计思想与实现步骤。通过分析和仿真说明, 该模型较原型具有更好的安全性和可用性。

参考文献:

- [1] ELUCK A A, UZUN E, PARIENIE M R. A reputation-based trust management system for P2P networks: proceedings of 4th IEEE/ACM International Symposium on Cluster Computing and the Grid [ C ]. Chicago: Illinois, 2004: 251-258.
- [2] 奚文, 王怀民. 构造基于推荐的 Peer-to-Peer 环境下的 Trust 模型 [ J ]. 软件学报, 2004, 15(4): 571-583.
- [3] ADAR E, HUBERMAN B A. Free riding on gnutella [ J/OL ]. [ 2000-05-10 ]. [http://firstmonday.org/issue5\\_10/adar/index.htm](http://firstmonday.org/issue5_10/adar/index.htm).
- [4] GUPTA M, JUDGE P, AMMAR M. A reputation system for Peer-to-Peer networks: proc. of NOSSDAV '03 [ C ]. [ S. l. ]: [ s. n. ], 2003: 144-152.
- [5] 张铁军, 张玉清, 战守义, 等. Peer-to-Peer 典型应用安全需求分析 [ J ]. 计算机工程, 2005, 31(20): 56-58, 69.
- [6] ABERER K, DEPOVIC Z. Managing trust in a Peer-to-Peer information system: the 9th International Conference on Information and Knowledge Management ( CIKM ) [ C ]. New York: ACM Press, 2001: 310-317.
- [7] RESNICK P, ZECKHAUSER R. Reputation systems [ J ]. **Communications of the ACM**, 2000, 43(12): 45-48.

(上接第 267 页) 对于 M-CSMA 协议同样涉及概率  $p$  和随机等待时间  $t_w$  的界定问题:  $p$  取值较大时, 监听信道的节点增加, 同时发送数据包的几率也随之增加, 信道上会产生大量数据包碰撞, 许多数据包必须延时重发, 从而导致信道的利用率急剧降低;  $p$  取值较小时, 表面上信道的利用率不会急剧下降, 实际上由  $p$  取值很小可知, 数据包立即发出的概率非常小, 数据包很大可能会延时重发。因此, 下一步工作的重点在于研究最佳的  $p$  值和  $t_w$  值, 以及它们与分簇网络的关系。

参考文献:

- [1] KYILDIZ I F, SU W, SANKARASUBRAMANIAM Y, et al. Wireless sensor networks: a Survey [ J ]. **Computer Networks**, 2002, 38: 393-422.
- [2] 孙利民, 李建中. 无线传感器网络 [ M ]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 7-8.
- [3] 郑少仁, 王海涛, 赵志峰, 等. Ad hoc 网络技术 [ M ]. 北京: 人民邮电出版社, 2005: 102.
- [4] HEINZELMAN W R, CHANDRAKSAN A, BALAKRISHMAN H. An

application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks [ J ]. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, 2002, 1(4): 660-670.

- [5] YOUNIS O, FAHMY S. Distributed clustering in Ad hoc sensor networks: a hybrid, energy-efficient approach [ C ]. [ S. l. ]: IEEE INFOCOM, 2004: 58-63.
- [6] MANJESHWAR A, AGRAWAL D P. TEEN: a routing protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks: proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium [ C ]. San Francisco: IEEE Computer Society, 2001: 2009-2015.
- [7] 黄大君, 周国祥, 王丰云. 基于 P-Persistent CSMA 改进协议的研究 [ DB/OL ]. [ 2005-10 ]. [http://www.gongkong.com/exhibit/lunwen/paper\\_detail.asp?id=1562](http://www.gongkong.com/exhibit/lunwen/paper_detail.asp?id=1562).
- [8] 于宏毅. 无线移动自组织网 [ M ]. 北京: 人民邮电出版社, 2005: 33.
- [9] CHEN Xiao-ming, HONG Geok-soon. A simulation study of the predictive p-persistent CSMA protocol: proceedings of the 35th Annual Simulation Symposium [ C ]. [ S. l. ]: IEEE, 2002: 102-110.